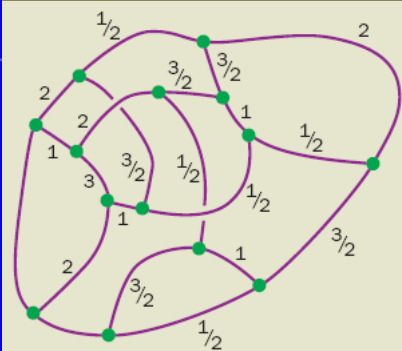


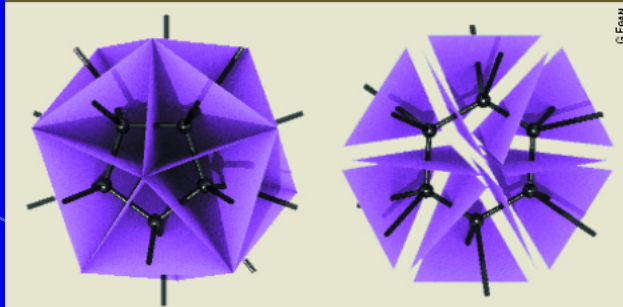
Relatividad general cuántica

1 Spin network

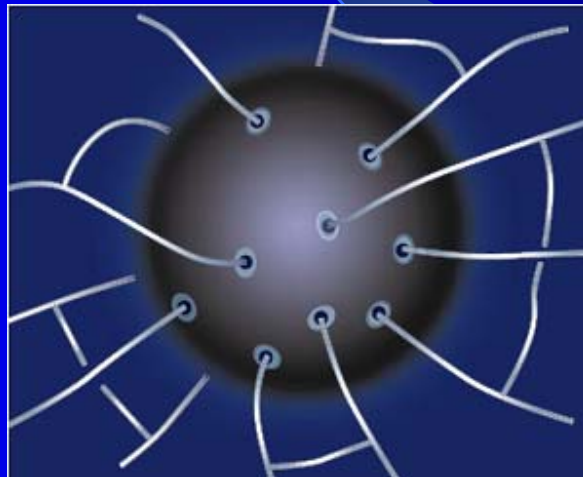


Elementary grains of space are represented by the nodes on a "spin network" (green dots). The lines joining the nodes, or adjacent grains of space, are called links. Spins on the links (integer or half-integer numbers) are the quantum numbers that determine the area of the elementary surfaces separating adjacent grains of space. The quantum numbers of the nodes, which determine the volume of the grains, are not indicated. The spins and the way they come together at the nodes can take on any integer or half-integer value, and are governed by the same algebra as angular momentum in quantum mechanics.

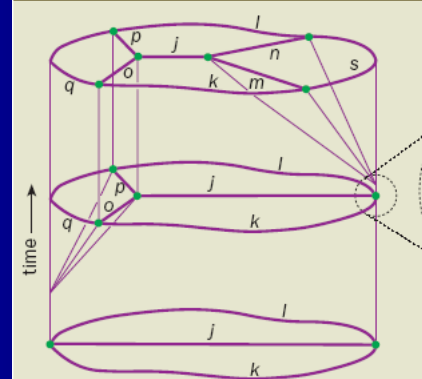
2 Quantum loops



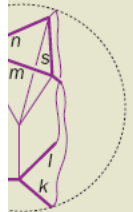
Each node in a spin network determines a cell, or an elementary grain of space. (a) Nodes are represented by small black spheres and the links as black lines, while cells are separated by elementary surfaces shown in purple. Each surface corresponds to one link, and the structure builds up a 3D space. (b) When the surfaces are pulled away we can see that the sequence of links form a loop. These are the "loops" of loop quantum gravity.



3 Spinfoam



Loop quantum gravity replaces the Newtonian concept of space with a history of spin networks called a spinfoam. Each node is associated with a quantum number of area called "spin" in units related to the Planck length. Here a θ -shaped network carrying spins j, k and l evolves in two time slices (top). It has two nodes where the three links meet, and the vertices define the edges of the spinfoam. The first vertex of a Feynman diagram – is where the left and right edges meet, which point an intermediate spin network with spins j, k and l formed. The edge on the right branches off in a second time slice, which is enlarged. The "faces" of the spinfoam are the links moving in time. The enlargement shows that the faces are connected to the four edges and six faces with associated spins j, k, l, m, n and s . Spinfoams like this one can be thought of as a discretized quantum



background space. The network is built up from these links, which is measured work (bottom) to a spin network. The network is built up from these links, which is measured work (bottom) to a spin network. The network is built up from these links, which is measured work (bottom) to a spin network.



- La física clásica y la teoría cuántica.

- La crisis de la física clásica, la radiación de cuerpo negro, efecto fotoeléctrico, efecto Compton...
- Estabilidad de los átomos.
- Precedente: el átomo de Bohr.



- Resuelve estos problemas y explica:

- Cómo funcionan los átomos y las moléculas.
- Estructura y comportamiento de los sólidos.
- Las propiedades de la radiación.
- Física de los constituyentes fundamentales de la materia (núcleos atómicos y partículas fundamentales).

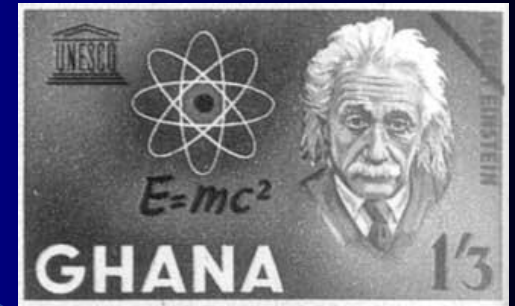


- Uno de los pilares de la física y tecnología modernas.

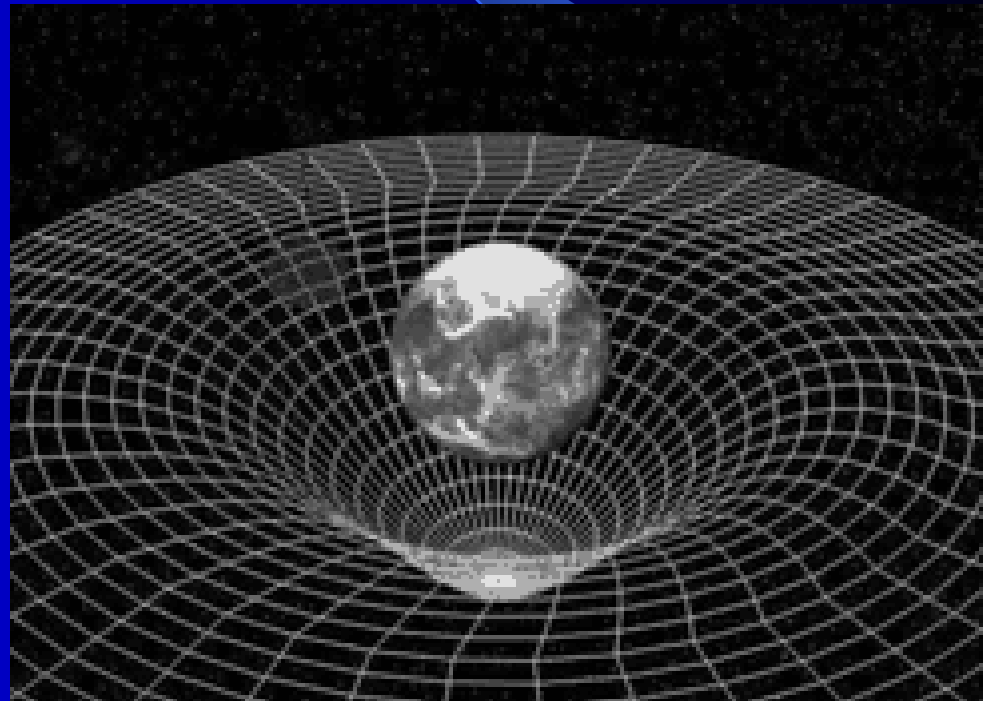


Gravitación relativista

La **relatividad general** es la teoría relativista de la gravitación.



- **Extiende** la teoría de Newton.
- Explica la gravedad como un efecto debido a la **curvatura del espacio-tiempo**.
- Nos dice que el espaciotiempo es un objeto físico **dinámico** influido por la **distribución de materia y energía**.

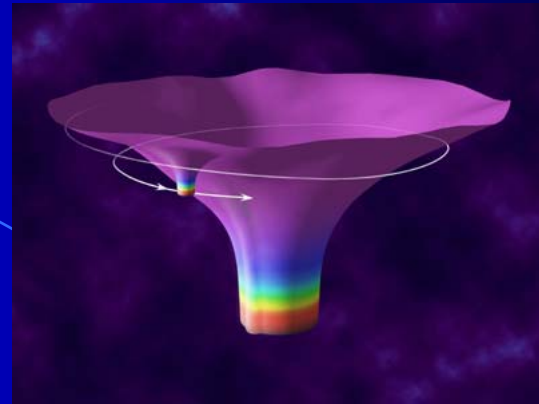


- Aplicaciones en astrofísica:

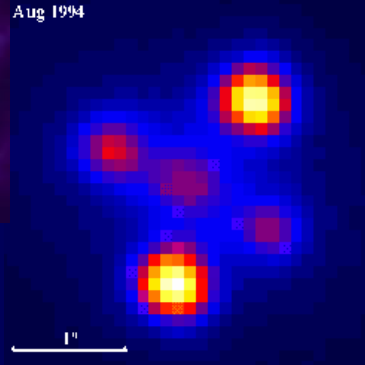
- Objetos compactos y relativistas.
- Estrellas de neutrones.
- Agujeros negros.
- Lentes gravitatorias.
- Radiación gravitacional.

- Cosmología:

- Estructura del universo.
- Geometría del universo.
- Origen, pasado y futuro.



Aug 1994

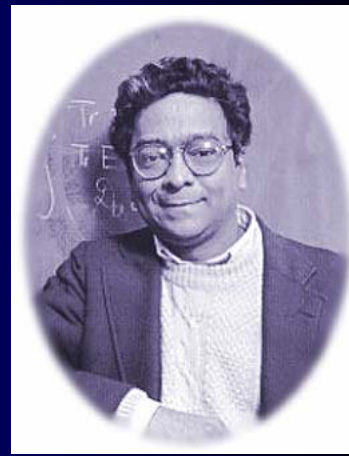


Algunas preguntas importantes

$$\hbar \oplus G_N$$

- ¿Pueden **combinarse** la mecánica cuántica y la relatividad general?
- ¿Qué podemos aprender sobre el espacio-tiempo en este proceso?
 - Existencia de singularidades (agujeros negros, origen del universo).
- ¿Existe una geometría cuántica?
 - La **estructura** y **funcionamiento** íntimos del espacio y del tiempo.

Una propuesta con futuro: la gravedad cuántica de lazos



- Un planteamiento distinto sobre la relatividad general (similar a una teoría de Yang-Mills).
 - Se basa en una formulación, debida a Ashtekar, en la que **la métrica no es el objeto básico**.

A_a^i conexión de $SO(3)$

\tilde{E}_i^a tríada *densitizada*

Formulación de Ashtekar

Variables canónicas

$$\Gamma(A_a^i, \tilde{E}_i^a)$$

Ligaduras

$$\nabla_a \tilde{E}_i^a = 0$$

$$F_{ab}^i \tilde{E}_i^b = 0$$

$$-\zeta \epsilon^{ijk} \tilde{E}_i^a \tilde{E}_j^b F_{abk} + \frac{2(\beta^2 \zeta - 1)}{\beta^2} \tilde{E}_{[i}^a \tilde{E}_{j]}^b (A_a^i - \Gamma_a^i) (A_b^j - \Gamma_b^j) = 0$$

- Identifica (propone) cual es la **microestructura del espacio** (excitaciones elementales en forma de grafos).

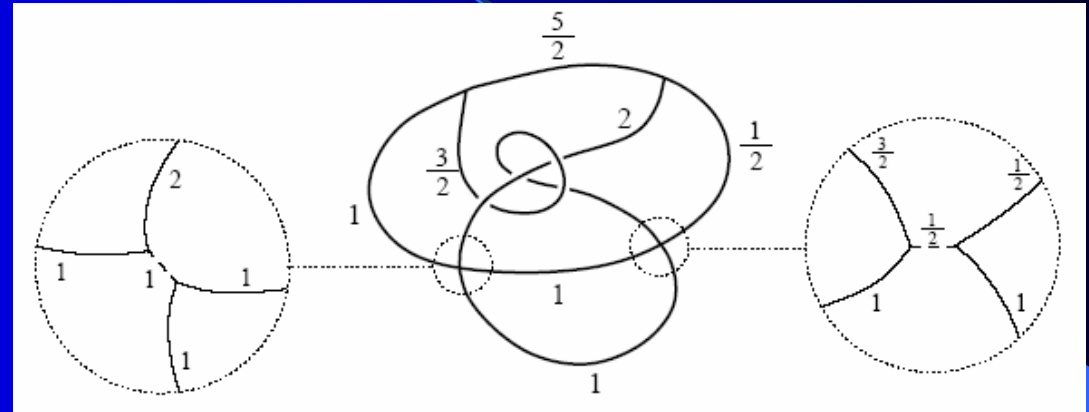
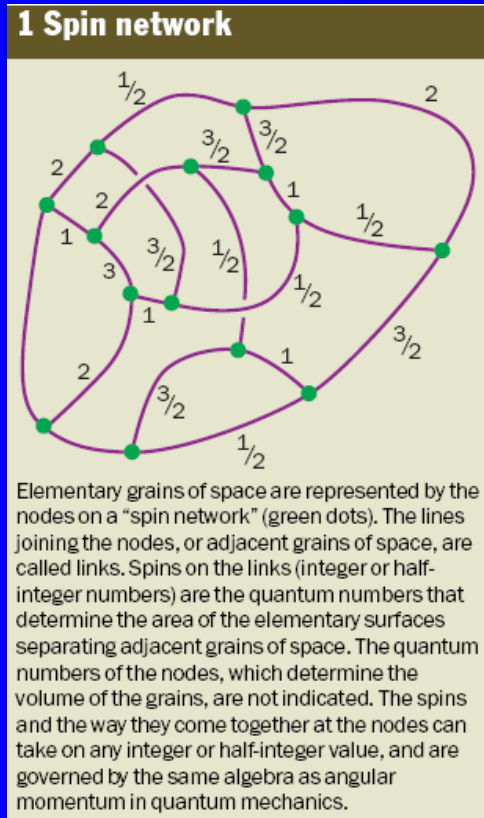


Figure 1: Spin-network state: At 3-valent nodes the intertwiner is uniquely specified by the corresponding spins. At 4 or higher valent nodes an intertwiner has to be specified. Choosing an intertwiner corresponds to decompose the n -valent node in terms of 3-valent ones adding new virtual links (dashed lines) and their corresponding spins. This is illustrated explicitly in the figure for the two 4-valent nodes.

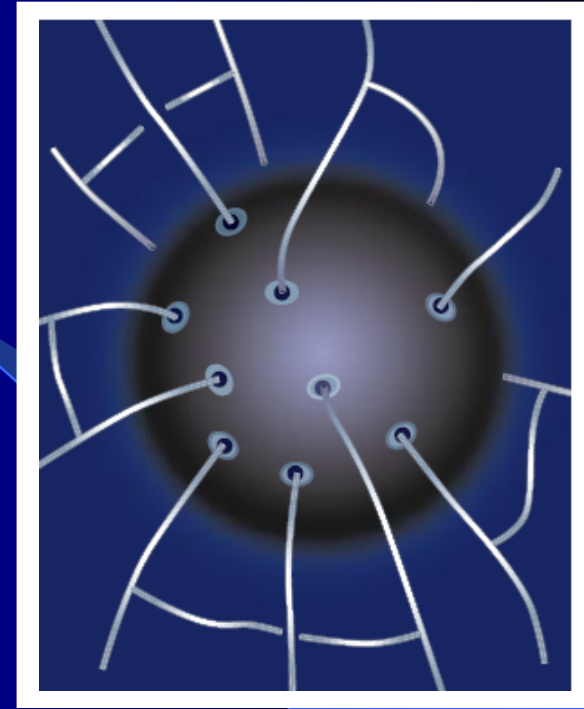
(Tomado de A. Pérez, gr-qc/0409061)

(Tomado de C. Rovelli, Phys. World. Nov. 2003)

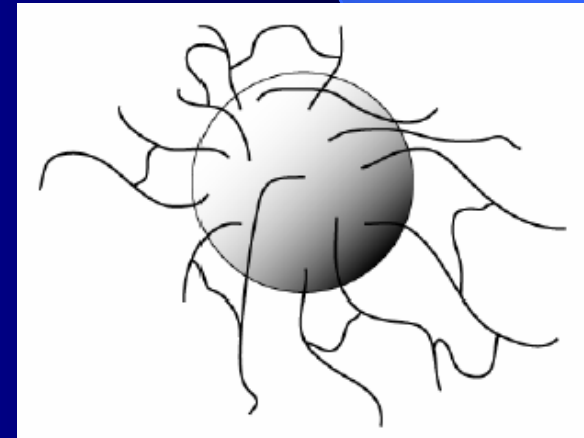
- Observables con **significado geométrico** (área o volumen).

Logros de la teoría

- Entropía de agujeros negros (Ashtekar, Baez, Corichi, Krasnov)
- Aplicaciones al estudio de los primeros instantes del universo (Bojowald, Ashtekar, Pawłowski, Singh,...).
- Estudio de singularidades en agujeros negros (Bojowald).
- Es un formalismo riguroso y consistente desde el punto de vista matemático.



J. Baez, Nature, 421, (2003)



(O. Dreyer)

Retos y problemas pendientes

- La **dinámica cuántica** del campo gravitatorio
- Conexión con el **régimen macroscópico** de la relatividad general, **predicciones observacionales** y **esquemas de aproximación** prácticos.
- Sería deseable que la teoría cuántica de la gravitación definitiva tuviera un **amplio conjunto** de aplicaciones (al menos teóricas) como, en su día, la mecánica cuántica.

Trabajo en nuestro grupo

- Aspectos teóricos sobre **variables de Ashtekar** (único grupo en España).
- **Cuantización** de modelos con simetría.
 - Ondas gravitatorias cilíndricas.
 - Modelos de Gowdy.
- Modelos **exactamente resolubles** clásica y cuánticamente.

Microcausalidad en ondas gravitatorias de Einstein-Rosen

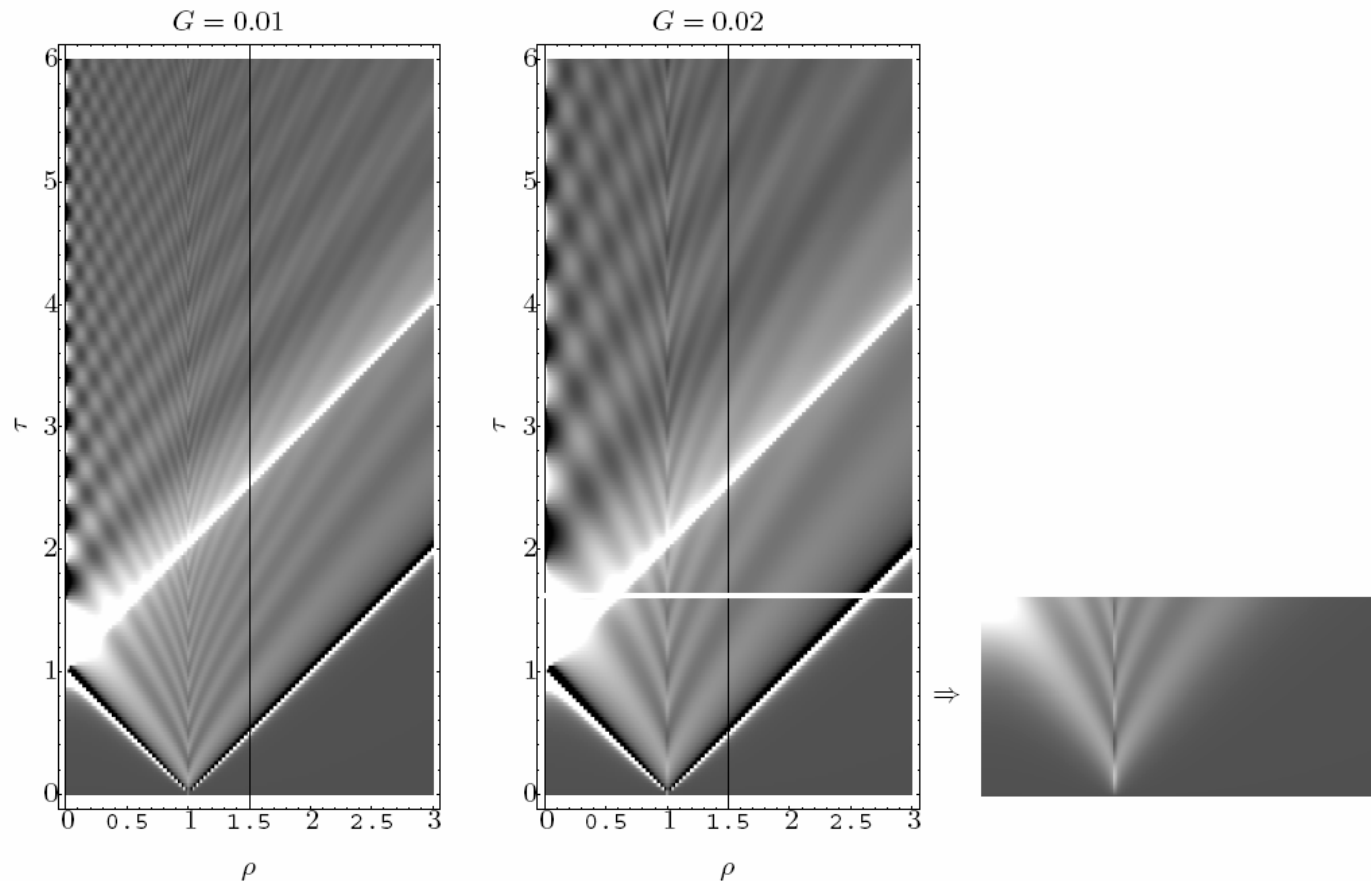


FIG. 2: Density plot of the asymptotic approximation in λ for the field commutator (over $8iG$) as a function of (ρ, τ) for $G = 0.01$ and $G = 0.02$. Notice the singular behavior of the approximation in the boundaries between the regions I, II, III, and on the axis. For comparison we show part of the plot for $G = 0.02$ obtained with the series expansion (16). Sections of these plots for $\rho = 0$ and $\rho = 1.5$ with $G = 0.02$ are shown in figs. 3 and 4.

Nuestro objetivo inmediato

- Entender la **cuantización** de estos modelos en todos sus aspectos, en especial sus signatures “experimentales”.
- Utilizarlos como **banco de pruebas** para su cuantización con variables de lazo.